

بررسی تأثیر عدم قطعیت بار بر اولویت اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار

داریوش نظریپور^۱، سجاد گلشن‌نواز^{۲*}، افشین محبوب‌خواه^۳

^۱ دانشیار گروه مهندسی برق قدرت، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

d.nazarpour@urmia.ac.ir

^۲ استادیار گروه مهندسی برق قدرت، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

s.golshannavaz@urmia.ac.ir

^۳ دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی برق قدرت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارومیه، ارومیه، ایران

amahboubkhah@hotmail.com

چکیده: در بستر شبکه‌های هوشمند و تعامل مستقیم بارها در مدیریت بهره‌برداری شبکه‌های توزیع، برنامه‌های متنوعی به منظور مشارکت بارها در پاسخ‌گویی بار و ایجاد انعطاف‌پذیری در آن‌ها تعریف شده است. مطالعات ابتدایی در زمینه تعیین اولویت اجرای هر یک از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر اساس روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و مدل اقتصادی بار برای منحنی بار ثابت پیشنهاد شده است. این در حالی است که رفتار مصرف‌کننده همواره با عدم قطعیت همراه است و عدم مدل‌سازی مناسب این ویژگی نتایج به دست آمده را به شدت دستخوش تغییر قرار می‌دهد. به این منظور، این مقاله سعی بر ارائه روشی کارآمد برای تعیین اولویت برنامه‌های پاسخ‌گویی بار با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار مصرف‌کننده دارد. بیان عدم قطعیت بار بر اساس منحنی توزیع نرمال برای هر دوره زمانی انجام می‌پذیرد. در ادامه، با تعریف سناریوهای متعدد و ارزیابی آن‌ها، اولویت اجرای هر یک از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر اساس روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر تاپسیس (TOPSIS) تعیین می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که اولویت‌بندی این برنامه‌ها شاهد تغییرات اساسی است. این بیان، اهمیت مسئله مدل‌سازی دقیق بار را در راستای تعیین برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و تعامل با مصرف‌کنندگان نمایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: اولویت‌بندی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، مدل اقتصادی بار، عدم قطعیت، روش تصمیم‌گیری چندمعیاره، روش تاپسیس.

۱. مقدمه

که اولویت اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار با در نظر گرفتن عدم قطعیت در منحنی مصرف نسبت به روش‌های قطعی با منحنی مصرف ثابت دستخوش تغییرات اساسی می‌شود. این نتیجه، اهمیت مدل‌سازی دقیق بار مصرفی را در راستای تعیین برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مؤثر برای تعامل مصرف‌کننده در مباحث مدیریت سمت مصرف نمایش می‌دهد.

۲. پاسخ‌گویی بار

اقدامات سمت مصرف در بخش خانگی و در زیر ساخت هوشمند روی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار استوار است که تعامل بین مصرف‌کننده و شرکت توزیع را برقرار می‌سازد. طبق تعریف ارائه شده، پاسخ‌گویی بار در واقع تغییرات به عمل آمده در مصرف انرژی الکتریکی پایه توسط مصرف‌کنندگان نهایی را شامل می‌شود که در پاسخ به تغییرات قیمت یا مشوق‌های دریافتی به منظور کاهش مصرف انرژی در ساعات گرانی قیمت برق یا ساعاتی که قابلیت اطمینان شبکه با مخاطره همراه است، اعمال می‌گردد [۹-۱۰].

در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار اثرات متفاوتی بر منحنی مصرف و در نتیجه شاخص‌های فنی و اقتصادی ایجاد می‌کنند [۱۱]:

- پیک‌سایی منحنی مصرف
- انتقال بار پیک به ساعات دیگر
- انتقال مصرف به دره‌های منحنی بار
- شکل‌دهی به منحنی بار در وضعیت بحرانی
- ایجاد منحنی بار تخت
- برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند:
- برنامه‌های مبتنی بر مشوق و جریمه
- برنامه‌های مبتنی بر قیمت

در این مقاله، برنامه‌هایی از هر دو گروه و همچنین ترکیب آن‌ها انتخاب و سپس مدل‌سازی و مورد تحلیل واقع می‌شوند.

۲.۱. برنامه مبتنی بر زمان استفاده

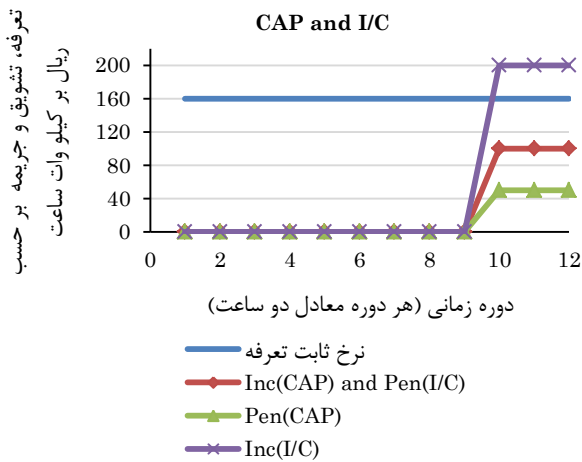
برنامه پاسخ‌گویی بار مبتنی بر زمان استفاده (TOU^۲) رایج‌ترین برنامه جاری در بین مصرف‌کنندگان مسکونی است و براساس سه بازه زمانی در طول روز اجرا می‌شود. هر بازه به نوعی انعکاسی از قیمت میانگین تولید برق در ساعات متعلق به آن بازه است. شکل (۱) نمودار سیگنال قیمت ارائه شده در برنامه TOU را نشان می‌دهد.

پس از وقوع تجدیدساختار در سیستم‌های قدرت و تشکیل بازارهای برق، اجرای برنامه‌های مدیریت مصرف بار ضروری شد. مدیریت مصرف بار به مجموعه اقداماتی اطلاق می‌شود که هدف آن‌ها ایجاد تغییر یا اصلاح الگوی مصرف توسط مشترکین است. تغییرات مصرف در پاسخ به تغییر در سیگنال قیمت برق در ساعات مختلف، پرداخت مشوق‌ها و اعمال جرایم اتفاق می‌افتد. کاهش مصرف در ساعات بحرانی، کاهش هزینه‌ها و نیز افزایش کارایی فنی شبکه از جمله اهدافی اصلی در اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار هستند [۱].

برای بررسی و تحلیل انواع روش‌های موجود در پاسخ‌گویی بار، مفاهیم و مدل‌های متعددی به وجود آمده‌اند. در مرجع [۲]، مفهوم کشسانی ارائه شده است که نوعی بیان حساسیت تقاضا در پاسخ به تغییر قیمت برق است. قبلاً مدل میزان تقاضا برای انواع برنامه‌های پاسخ‌گویی بار معرفی شده است [۳-۵]. این مدل به‌طور کامل در مرجع [۶] معرفی و مورد استفاده واقع شده است. در این مرجع، میزان تقاضا براساس انواع برنامه‌های پاسخ‌گویی بار شبیه‌سازی شده و اثرات آن‌ها روی برخی پارامترهای مهم از جمله بار اوج، انرژی مصرفی کل، ضریب بار و نسبت بار اوج به بار حداقل مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. محاسبات با فرض یک منحنی بار در پرمصرف‌ترین روز سال بنا شده است. در تمامی این مطالعات و مدل‌های ارائه شده، فرض شده است که میزان تقاضای اولیه بار پیش از اعمال برنامه‌ها براساس یک منحنی ثابتی تغییر می‌کند. در حالی که چنین فرضی منطبق بر وضعیت واقعی سیستم قدرت نیست؛ چراکه اساساً میزان مصرف مشترکین همواره با عدم قطعیت همراه بوده و در هر ساعت به صورت یک منحنی توزیع احتمال با توزیع نرمال مدل می‌شود.

عدم قطعیت بار و تأثیر آن بر اولویت‌بندی انواع برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به عنوان هدف اصلی مطالعه پیش رو مطرح است. به این منظور، منحنی مصرف براساس تابع توزیع احتمال نرمال مدل‌سازی شده و تأثیر عدم قطعیت بار بر اولویت‌بندی انواع برنامه‌های پاسخ‌گویی بار از سه دیدگاه مختلف شامل مصرف‌کننده، تولیدکننده و بهره‌بردار سیستم مدل‌سازی می‌شود. سناریوهای مختلفی براساس عدم قطعیت در نظر گرفته شده مدل‌سازی شده و مورد مطالعه قرار می‌گیرند. براساس نتایج به دست آمده و با استفاده از روش تاپسیس (TOPSIS^۱) [۷] که یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمتغیره [۸] است، اولویت‌بندی برنامه‌ها در کل مجموعه سناریوهای بررسی شده انجام می‌گیرد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد

می‌بایست کاهش داده شود، از قبل توافق شده است. بنابراین، هم میزان تشویق و هم میزان جریمه سنگین‌تر است. شکل (۳) تعرفه CAP و I/C را نمایش می‌دهد.



شکل (۳): منحنی قیمت مبتنی بر CAP و I/C

۵.۲ برنامه‌های ترکیبی

از ترکیب برنامه TOU و برنامه‌های CAP و I/C، دو برنامه ترکیبی ایجاد می‌شود. این برنامه‌ها در واقع همان برنامه مبتنی بر زمان استفاده هستند که تشویق و جریمه به آن‌ها اضافه شده است.

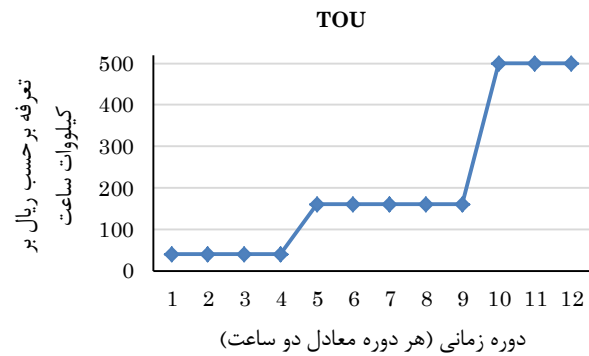
۳. مدل اقتصادی بار پاسخ‌گو

برای ارزیابی مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، توسعه مدلی که مشخصات پروفیل بار و سود و زیان مصرف‌کنندگان را با توجه به قیمت‌های برق، پرداخت‌های تشویقی و جریمه‌ها تعیین کند، امری ضروری است. برای نشان دادن حساسیت بار نسبت به تغییرات قیمت می‌توان از مفهومی به نام کشسانی یا کشسانی بار استفاده کرد. کشسانی بار به صورت حساسیت تقاضا نسبت به تغییرات قیمت تعریف می‌شود [۲]. رابطه ارائه شده در فرمول (۱) بیان ریاضی کشسانی بار را نمایش می‌دهد.

$$\varepsilon = \frac{\rho_0}{d_0} \frac{\partial d}{\partial \rho} \quad (1)$$

که در آن، ρ قیمت برق، d میزان تقاضا، ε کشسانی، ρ_0 و d_0 مقادیر قیمت و بار قبل از اعمال تغییرات قیمت هستند. در مرجع [۲] کشسانی دوره زمانی i ام نسبت به تغییرات قیمت در دوره زمانی j ام به صورت رابطه (۲) تعریف شده است:

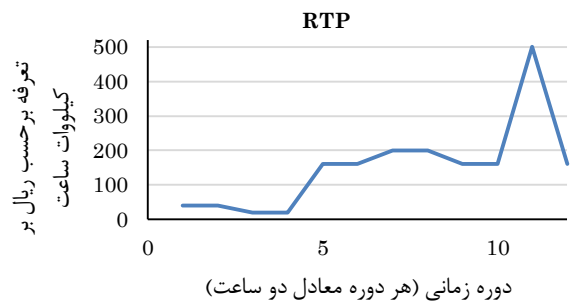
$$\varepsilon(i, j) = \frac{\rho_0(j)}{d_0(i)} \frac{\partial d(i)}{\partial \rho(j)} \quad (2)$$



شکل (۱): منحنی قیمت در برنامه زمان استفاده (TOU)

۲.۲ برنامه مبتنی بر قیمت لحظه‌ای

برنامه پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت لحظه‌ای (RTP) مبتنی بر قیمت لحظه‌ای برق بوده و چند ساعت قبل از اعمال به مشترکین اعلام می‌شود. در شکل (۲) منحنی مورد استفاده در این برنامه نمایش داده شده است.



شکل (۲): منحنی قیمت لحظه‌ای برق

قیمت اعلامی به مصرف‌کننده، انعکاسی از قیمت عمده‌فروشی بازار برق بوده و نشان‌دهنده نوسانات قیمت است.

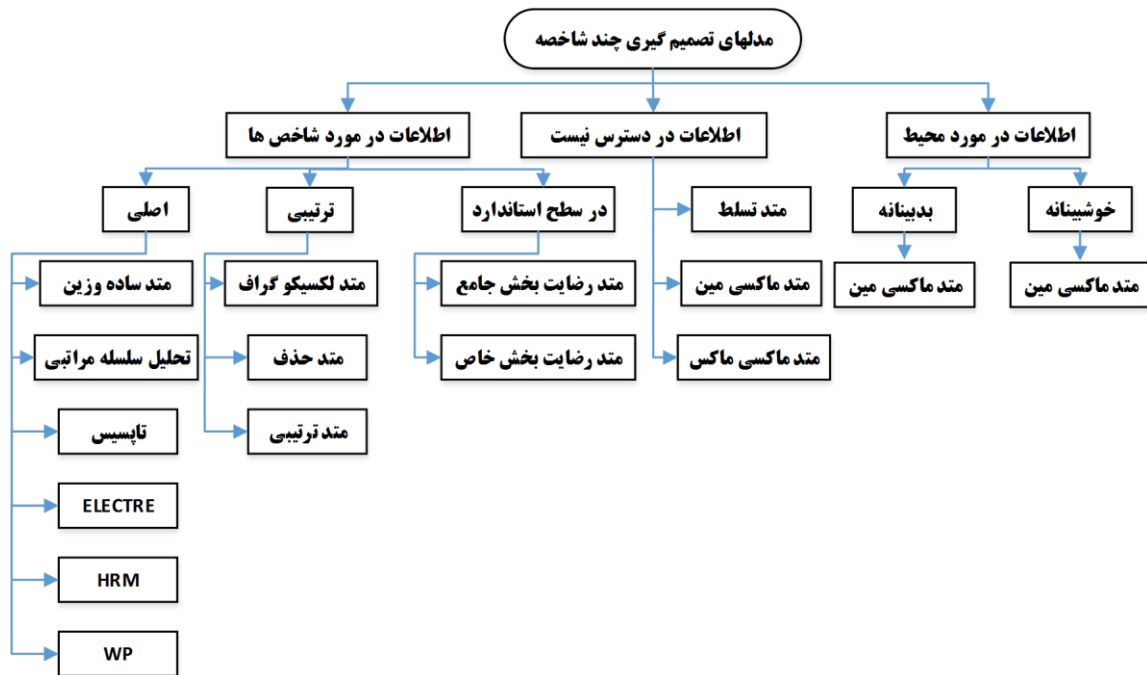
۳.۲ برنامه مبتنی بر ظرفیت بازار

در برنامه پاسخ‌گویی بار ظرفیت بازار (CAP^۲)، مصرف‌کنندگان بزرگ توافق می‌کنند که در صورت درخواست شرکت برق و در ساعت‌های اوج مصرف، میزان مصرف خود را کاهش داده و از مزایای تشویقی آن بهره‌مند شوند. در صورت عقد قرارداد مشارکت و عدم کاهش در بار مصرفی، به آن مصرف‌کننده جریمه تعلق می‌گیرد.

۴.۲ برنامه مبتنی بر قطع یا کاهش بار

برنامه پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قطع یا کاهش بار مصرف‌کننده (I/C^۳) مشابه برنامه CAP است با این تفاوت که مقدار توانی که

1. Real Time Pricing
2. Capacity Market Program
3. Interruptible/Curtailable Services



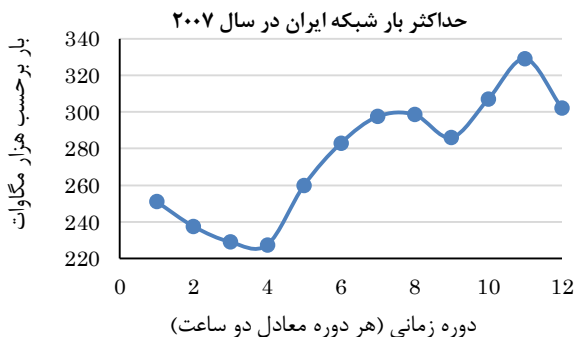
شکل (۴): دسته‌بندی انواع روش‌های مبتنی بر MADM [۱۳]

برای اولویت‌بندی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار استفاده شده است. معیارهای انتخاب‌شده از دید قانون‌گذار مطابق زیر مشخص شده است:

- بار اوج منحنی مصرف
- درصد کاهش اوج بار پس از اجرای برنامه
- مقدار کل انرژی مصرفی
- درصد کاهش انرژی کل مصرفی
- ضریب بار
- نسبت بار اوج به حداقل بار

۵. اولویت‌بندی متداول برنامه‌ها با منحنی بار ثابت

منحنی بار اولیه d_0 مطابق شکل (۵) ارائه شده که در واقع مربوط به حداکثر بار شبکه ایران در سال ۲۰۰۷ است.



شکل (۵): منحنی حداکثر بار شبکه ایران

به منظور انجام محاسبات، ماتریس کشسانی مربوطه تشکیل شده و با اعمال مدل اقتصادی بار مطابق معادله (۳)، مقادیر عددی هر یک از

با در نظر گرفتن مقادیر مشوق و جریمه در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، مدل اقتصادی بار را می‌توان براساس رابطه (۳) بیان کرد [۶]:

$$d(i) = d_0(i) \left\{ 1 + \sum_{j=1}^{12} \varepsilon(i, j) \left[\frac{\rho(j) - \rho_0(j) + Inc(j) - Pen(j)}{\rho_0(j)} \right] \right\} \quad (3)$$

در این رابطه، $Inc(j)$ میزان تشویق و $Pen(j)$ میزان جریمه اعمالی را نشان می‌دهد. براساس مقدار مشوق و جریمه اعمالی، جایگاه هر یک از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار جابه‌جا شده و در اولویت‌نهایی آن تأثیر می‌گذارد.

۴. مدل تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه

برای اولویت‌بندی برنامه‌های معرفی‌شده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (MADM) استفاده شده است. در این روش، چندین معیار که گاه با هم متضاد هستند در نظر گرفته می‌شود [۱۲]. تصمیم‌گیری چندمعیاره براساس روش‌های مختلفی انجام می‌پذیرد که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و همین‌طور TOPSIS^۳ که در این مقاله استفاده شده‌اند.

شکل (۴) دسته‌بندی انواع روش‌های MADM را نشان می‌دهد [۱۳]. براساس این دسته‌بندی و اطلاعات موجود، از معیارهای مختلف

1. Multi Attribute Decision Making
2. Analytical Hierarchy Process
3. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

می‌بایستی در تعیین اولویت، برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مورد ارزیابی واقع گردد. این تعداد سناریو به بار محاسباتی بزرگی منجر می‌شود. به منظور تعدیل در تعداد سناریوها، بازه‌های زمانی دوساعته در نظر گرفته شده و در نتیجه به تعداد ۱۲ تابع توزیع احتمال برای دوره برنامه‌ریزی در نظر گرفته می‌شود. براین اساس، تعداد کل سناریوها برابر ۳۱۲ می‌باشد که هر یک مورد ارزیابی واقع می‌شوند.

به منظور تحلیل تعداد کل سناریوها و تسهیل آنالیز آن‌ها از روشی ابداعی بهره گرفته می‌شود. در این فرایند، جداول امتیازبندی برای جایگاه‌های مختلف در نظر گرفته شده و برای هر یک از برنامه‌های پاسخ‌گویی مورد بررسی یک ردیف اختصاص داده شده است. در این جدول، وضعیت هر یک از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار از نقطه نظر جایگاه مورد بررسی در کل سناریوها استخراج شده و اولویت نهایی در جدول اولویت استخراج می‌شود. هر جدول شامل دو ستون و شش ردیف است. همان‌طوری که ذکر شد، هر یک از ردیف‌ها در ارتباط با برنامه پاسخ‌گویی خاصی است. در ستون اول، تعداد دفعاتی که برنامه مربوطه آن جایگاه را کسب می‌کند ثبت می‌شود. میزان نمره اکتسابی توسط هر برنامه نقش اساسی در تعیین رده‌بندی نهایی دارد. اینکه یک برنامه با چه امتیازی در جایگاه مورد نظر قرار دارد و چه فاصله‌ای با دیگر برنامه‌ها دارد، از ارزش ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین در هر دور تکرار برنامه، میانگین امتیاز اکتسابی طبق فرمول (۵) محاسبه و در ستون دوم ثبت می‌شود:

$$P_{New} = \frac{P_{New} + P_{old} (Counter - 1)}{Counter} \quad (5)$$

در این فرمول، P_{old} امتیاز اکتسابی یک برنامه پاسخ‌گویی بار به‌خصوص در سناریوهای مورد ارزیابی واقع شده قبلی، P_{New} امتیاز اکتسابی در آخرین تکرار و $Counter$ شماره تکرار است. اساس این روش، شمارش تعداد کل جایگاه‌هایی است که یک برنامه پاسخ‌گویی خاص آن را تجربه می‌کند و سپس براساس نرمالیزه کردن با تعداد کل سناریوها، امتیاز آن برنامه به‌خصوص از نقطه نظر قرارگیری در آن جایگاه به‌دست می‌آید. در جداول (۲) تا (۷)، نتایج این مرحله از محاسبات درج شده است. در مرحله نهایی، براساس روش TOPSIS اولویت نهایی اجرای هر یک از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار تعیین می‌گردد. پس از محاسبه مشاهده می‌شود که برخی از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در دو یا چند جایگاه مختلف قرار گرفته‌اند. در چنین وضعیتی، بالاترین جایگاه اکتسابی به‌عنوان اولویت آن برنامه پاسخ‌گویی بار منظور می‌گردد. نتایج محاسبات در جدول (۸) ثبت شده است.

معیارهای ذکر شده در بند ۴ محاسبه می‌شود. براین اساس، ماتریس تصمیم برای استفاده در روش TOPSIS تشکیل می‌شود. در ادامه با در نظر داشتن معیارهای مهم از دیدگاه قانون‌گذار، اولویت‌بندی برنامه‌ها براساس روش TOPSIS انجام می‌گیرد. در حالت قطعی و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت بار، نتیجه به‌دست آمده مطابق جدول (۱) حاصل می‌شود.

جدول (۱): اولویت‌بندی با منحنی بار ثابت

اولویت برنامه‌ها	نام برنامه
۱	TOU
۲	TOU+CAP
۳	TOU+I/C
۴	I/C
۵	RTP
۶	CAP

۶. اولویت‌بندی پیشنهادی برنامه‌ها با ملاحظه عدم قطعیت‌ها

در روش‌های متعارف محاسبه اولویت‌بندی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار که در بند قبل انجام گرفت، فرض اساسی مبتنی بر یک منحنی بار ثابت بوده است که مقدار d_0 از روی آن اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۵). این فرض، اگرچه محاسبات را ساده‌تر می‌کند، منطبق بر رفتار واقعی بارها در سیستم قدرت نیست. مطالعات آماری نشان می‌دهد رفتار بار الکتریکی مصرف‌کنندگان دارای عدم قطعیت بوده و از تابع توزیع نرمال تبعیت می‌کند. معادله (۴) تابع چگالی احتمال نرمال را نشان می‌دهد. در این توزیع، مقدار میانگین همان مقدار پیش‌بینی شده در نظر گرفته می‌شود و مقدار انحراف از معیار مطابق اطلاعات تاریخی تعیین می‌گردد.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

در این مطالعه، رفتار بار الکتریکی همراه با عدم قطعیت در نظر گرفته شده است. برنامه‌ریزی مورد نظر در قالب روزانه مدنظر است. در این رویکرد، برای هر یک از ساعات مورد بررسی در یک روز نمونه، یک توزیع احتمال نرمال در نظر گرفته می‌شود. توزیع احتمال نرمال مربوطه به هر ساعت مورد بررسی با سه سناریوی معادل مدل می‌شود. سناریوی نخست منطبق بر مقدار بار پیش‌بینی شده اولیه (d_0) و دو سناریوی دیگر این سطح بار را با در نظر داشتن ۵ درصد انحراف در مقدار متوسط پیش‌بینی شده مدل می‌نمایند. در این صورت در کل به تعداد ۳۲۴ سناریو

جدول (۷): امتیازبندی برای جایگاه ششم

برنامه	تعداد	امتیاز
TOU	۰	۰
RTP	۱۹۶۸۳۲	۰/۰۰۱
CAP	۲۲۱۶۶۱	۰/۰۱۶
IC	۰	۰
TOU+CAP	۰	۰
TOU+IC	۱۱۲۹۴۸	۰/۰۰۸

جدول (۸): اولویت‌بندی با وجود عدم قطعیت بار

نام برنامه	اولویت برنامه‌ها
RTP	۱
TOU+CAP	۲
TOU+I/C	۳
CAP	۴

۷. تحلیل نتایج

در بخش قبلی، نتایج حاصل از مطالعات عددی در جداول (۱) تا (۸) ارائه شد. همان‌طور که از جدول (۱) مشخص است، در صورت به‌کارگرفتن منحنی ثابت بار، برنامه TOU به‌عنوان اولویت اجرای پاسخ‌گویی بار تعیین شده است. این در حالی است که با در نظر گرفتن عدم قطعیت در منحنی بار مصرفی و طبق نتایج حاصل در جدول (۸)، برنامه RTP جایگزین برنامه TOU شده و به‌عنوان اولویت نخست اجرای پاسخ‌گویی بار مطرح شده است. مدل‌سازی دقیق‌تر عکس‌العمل بار به سیگنال قیمت و نوسانات موجود در منحنی بار چنین نتیجه‌ای را توجیه می‌کند و در نتیجه می‌بایستی از تعرفه‌گذاری دقیق و سیگنال‌های قیمت مناسب‌تر در محاسبات بهره‌گرفته شود. با توجه به جداول (۱) و (۸) مشاهده می‌شود که برنامه‌های قرارگرفته در جایگاه‌های دوم و سوم دستخوش تغییر نشده و همچنان برنامه‌های TOU+CAP و TOU+I/C اولویت‌های بعدی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار را به خود اختصاص داده‌اند. طبق جدول (۸) برنامه CAP مشابه حالت قبل در اولویت آخر اجرا قرار گرفته است. این در حالی است که در تحلیل سناریوهای مختلف موجود در منحنی بار همراه با عدم قطعیت، برنامه‌های TOU و I/C در اولویت اجرا قرار نگرفته و برنامه‌های مناسبی تشخیص داده نمی‌شوند. این نتیجه کارکرد ضعیف روش‌های قبلی را که از منحنی ثابت بار و بدون لحاظ نمودن عدم قطعیت جهت تعیین اولویت برنامه‌های پاسخ‌گویی بار پایه‌ریزی شده‌اند، نشان می‌دهد. همان‌طوری که جدول (۱) نمایش می‌دهد، اینچنین رویکردی منجر به تعیین برنامه TOU به‌عنوان اولویت اصلی پاسخ‌گویی بار می‌گردد. این

جدول (۲): امتیازبندی برای جایگاه اول

برنامه	تعداد	امتیاز
TOU	۱۹۳۸۹۶	۰/۲۴۹
RTP	۱۳۲۰۶۲	۰/۳۸۳
CAP	۱۳۲۶۷۸	۰/۲۴۳
IC	۳۷۹۱۳	۰/۱۷۵
TOU+CAP	۳۴۸۹۲	۰/۰۹۸
TOU+IC	۰	۰

جدول (۳): امتیازبندی برای جایگاه دوم

برنامه	تعداد	امتیاز
TOU	۸۲۸۵۱	۰/۲۰۲
RTP	۳۲۰۸۰	۰/۰۴۶
CAP	۸۷۴۸۰	۰/۱۶۲
IC	۱۳۳۸۷۰	۰/۲۲۴
TOU+CAP	۱۶۰۶۵۲	۰/۲۴۱
TOU+IC	۳۴۵۰۸	۰/۰۸۵

جدول (۴): امتیازبندی برای جایگاه سوم

برنامه	تعداد	امتیاز
TOU	۱۶۷۲۱۴	۰/۲۰۷
RTP	۲۱۱۲	۰/۰۲۶
CAP	۲	۰/۰۴۷
IC	۱۱۲۵۹۶	۰/۱۳۶
TOU+CAP	۱۰۰۱۵۷	۰/۱۹۵
TOU+IC	۱۴۹۳۶۰	۰/۲۳۰

جدول (۵): امتیازبندی برای جایگاه چهارم

برنامه	تعداد	امتیاز
TOU	۸۷۴۸۰	۰/۰۹۲
RTP	۷۸۳۳۲	۰/۱۴۹
CAP	۱۲	۰/۰۲۳
IC	۱۲۸۹۶۴	۰/۱۴۵
TOU+CAP	۱۲۴۹۲۰	۰/۱۵۱
TOU+IC	۱۱۱۸۳۳	۰/۱۸۶

جدول (۶): امتیازبندی برای جایگاه پنجم

برنامه	تعداد	امتیاز
TOU	۰	۰
RTP	۹۰۱۲۳	۰/۱۰۸
CAP	۸۹۶۰۸	۰/۱۱۶
IC	۱۱۸۰۹۸	۰/۱۰۲
TOU+CAP	۱۱۰۸۲۰	۰/۰۶۴
TOU+IC	۱۲۲۷۹۲	۰/۱۱۰

- برنامه مبتنی بر قطع یا کاهش بار I/C
- برنامه ترکیبی مبتنی بر TOU+CAP
- برنامه ترکیبی مبتنی بر TOU+I/C

همان‌طور که ذکر شد، اولویت اجرای هر یک از این برنامه‌ها براساس اهداف بهره‌برداری و از دیدگاه مصرف‌کننده، تولیدکننده و بهره‌بردار متفاوت است. از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره برای اولویت‌بندی برنامه‌های فوق بهره گرفته شد و به این منظور، روش TOPSIS به عنوان مدل انتخاب استفاده گردید. معیارهای مورد ارزیابی در انتخاب اولویت‌ها به صورت زیر انتخاب شدند:

- بار اوج منحنی مصرف
- درصد کاهش اوج بار پس از اجرای برنامه
- مقدار کل انرژی مصرفی
- درصد کاهش انرژی کل مصرفی
- ضریب بار
- نسبت بار اوج به حداقل بار

مدل مناسبی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت بار ارائه و براساس آن، تعداد سناریوهای مناسبی برای انجام محاسبات و اولویت‌بندی‌ها برنامه‌ها استخراج شد. برای هر کدام از این سناریوها اولویت‌بندی برنامه‌ها استخراج و جداول مربوط به هر اولویت اجرای پاسخ‌گویی بار تکمیل شدند. در نهایت، اولویت اجرای پاسخ‌گویی بار براساس روش TOPSIS و با در نظر داشتن تمامی نتایج به دست آمده تعیین شد. همان‌طور که مشاهده شد، با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار اولویت برنامه‌ها دستخوش تغییر می‌شود و برخی از برنامه‌ها نیز عملاً از اولویت اجرا خارج می‌شوند. مهم‌ترین این برنامه‌ها، برنامه TOU است که فعلاً در ایران اجرا می‌شود و با احتساب عدم قطعیت بار حذف می‌شود. برنامه RTP از جایگاه پنجم به اولویت نخست اجرا صعود می‌کند. کسب جایگاه نخست توسط برنامه RTP لزوم تغییر در شبکه سستی و حرکت به سمت شبکه هوشمند را بیشتر نمایان می‌سازد. همچنین مشاهده شد که افزایش میزان جریمه یا تشویق همواره کارساز نیست و لازم است میزان آن‌ها با توجه به شاخص‌های مهم شبکه بهینه‌سازی شود. برنامه‌های صرفاً تشویقی یا تنبیهی کارایی لازم را ندارند و ترکیب آن‌ها با برنامه‌های مبتنی بر زمان، نتیجه بهتری را در بر خواهد داشت.

در حالی است که برنامه مذکور هیچ‌یک از اولویت‌های پاسخ‌گویی بار را در جدول (۸) به خود اختصاص نداده است. حذف برنامه TOU، رایج‌ترین برنامه در بین مشترکین مسکونی که قبلاً در رده نخست قرار گرفته بود، بسیار حائز اهمیت است. به عبارتی، با راه‌اندازی شبکه هوشمند در ایران، تعرفه کنونی کنتورهای برق که با برنامه TOU برنامه‌ریزی شده‌اند، کارایی مناسبی نخواهند داشت. از طرف دیگر، این نتایج نشان می‌دهد اجرای برنامه CAP به تنهایی گزینه خوبی نبوده و ترکیب آن با برنامه مبتنی بر زمان استفاده TOU کارایی بهتری خواهد داشت.

حذف برنامه I/C نشان‌دهنده این موضوع است که برنامه مبتنی بر تشویق و جریمه به تنهایی نمی‌تواند بر پارامترهای مهم شبکه تأثیرگذار باشد، به خصوص اگر میزان جریمه و تشویق بالا باشد. همچنین مقایسه دو برنامه CAP و I/C نشان می‌دهد که افزایش میزان تشویق و جریمه در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار عملاً منجر به عدم تحقق اهداف بهره‌برداری سیستم می‌شود. بنابراین از دیدگاه قانون‌گذار بایستی مقدار تشویق و جریمه با توجه به پارامترهای مهم، به طور بهینه انتخاب شود. در کل می‌توان نتیجه گرفت که برنامه‌های صرفاً تنبیهی یا صرفاً تشویقی حذف شده یا در رده‌های پایین قرار می‌گیرند.

کسب اولویت نخست اجرای پاسخ‌گویی بار براساس برنامه RTP نشان‌دهنده این موضوع است که به منظور بهبود شاخص‌های اقتصادی و فنی شبکه لازم است که شبکه‌های کنونی از حالت منفعل و یک‌طرفه فاصله گرفته و به یک شبکه هوشمند تبدیل گردند. اجرای این برنامه در شبکه سستی موجود امکان‌پذیر نیست؛ چراکه زیرساخت‌های ارتباطی لازم برای اعلام قیمت لحظه‌ای به مشترکین ایجاد نشده است. ارتباطات دوطرفه در بستر هوشمند شبکه، امکان پیاده‌سازی تعرفه‌های زمان حقیقی RTP را به سادگی فراهم می‌آورد.

۸ نتیجه‌گیری

در این مقاله، نخست مقدمه‌ای بر مفاهیم پاسخ‌گویی بار و نیز مدیریت سمت مصرف ارائه شد. اهم برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به صورت زیر دسته‌بندی شد:

- برنامه مبتنی بر زمان استفاده TOU
- برنامه مبتنی بر قیمت لحظه‌ای RTP
- برنامه مبتنی بر بازار ظرفیت CAP

مراجع

[1] Li, C., Yu, X., Yu, W., Chen, G., Wang, J. "Efficient Computation for Sparse Load Shifting in Demand Side Management", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 8,

No. 1, pp. 250-261, 2017.

[2] Paterakis, N.G., Taşçıkaraoğlu, A., Erdiç, O., Bakirtzis, A.G., Catalão, J.P.S., "Assessment of Demand-Response-

- Driven Load Pattern Elasticity Using a Combined Approach for Smart Households*," IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 12, No. 4, pp. 1529-1539, 2016.
- [3] Yu, N., Yu, J., "Optimal TOU Decision Considering Demand Response Model", IEEE International Conference on Power System Technology, pp.1-5, 2006.
- [4] Aalami, H., Yousefi, G.R., Moghaddam, M.P., "ADM-Based Support System for DR Programs", 43rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), pp.1-7, 2008.
- [5] Yousefi, A., Aalami, H., Shayesteh, E., Moghaddam, M.P., "Enhancement of Spinning Reserve Capacity by Means of Optimal Utilization of EDRP Program", Proceedings of the Fourth IASTED International Conference, Power and Energy Systems (Asia PES), pp. 153-158, 2008.
- [6] Aalami, H.A., Parsa Moghaddam, M., Yousefi, G.R., "Modeling and Prioritizing Demand Response Programs in Power Markets", Electric Power Systems Research, Vol. 80, No. 4, pp. 426-435, 2010.
- [7] Paterakis, N.G., et al., "Multi-Objective Reconfiguration of Radial Distribution Systems Using Reliability Indices", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, No. 2, pp. 1048-1062, 2016.
- [8] Hwang, C.L., Yoon, K., "Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications a State-of-the-Art Survey", Vol. 186. Springer Science & Business Media, 2012.
- [9] Deng, R., Yang, Z., Chow, M.Y., Chen, J., "A Survey on Demand Response in Smart Grids: Mathematical Models and Approaches", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 11, No. 3, pp. 570-582, 2015.
- [10] Siano, P., Sarno, D., "Assessing the Benefits of Residential Demand Response in a Real Time Distribution Energy Market", Applied Energy, Vol. 161, pp. 533-551, Jan. 2016.
- [۱۱] جدید، شهرام، ذکریازاده، علیرضا، «شبکه‌های توزیع هوشمند»، مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۳.
- [12] Tzeng, G.H., Huang, J.J., "Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications", CRC press, 2011.
- [۱۳] محمد مرادی، اصغر، اخترکاو، مهدی، «روش‌شناسی مدل‌های تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره»، مجله آرمانشهر، شماره ۲، صفحه ۱۱۳-۱۲۵، بهار و تابستان ۱۳۸۸.